

УДК 620.9:697.1
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.16](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.16)

ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR RECOVERING THE THERMAL POTENTIAL OF VENTILATION EXHAUST AIR

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ВИКИДІВ

Oleksandr V. Baraniuk
olexandr.baranyuk@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6008-6465

Serhii L. Tykhoniuk
tykhoniuksergii@gmail.com
ORCID: 0009-0001-7797-6189

О. В. Баранюк,
канд. техн. наук, доцент

С. Л. Тихонюк,
здобувач вищої освіти

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Abstract. Purpose. This study aims to conduct a comprehensive analysis of modern technologies for waste heat recovery from ventilation exhaust air and to evaluate their role in ensuring regulatory requirements for building energy efficiency. The main focus is on identifying the most effective configurations of heat recovery systems for various types of facilities in the context of the decarbonization of Ukraine's energy sector.

Methodology. The work applies methods of systemic analysis of the current regulatory framework (DBN, EU Directives) and a comparative analysis of the technical characteristics of modern ventilation equipment. A thermodynamic approach is used to evaluate heat transfer efficiency in rotary, plate heat exchangers, and heat pipe-based systems. The study is based on modeling low-potential heat recovery processes using heat pump cycles based on compressor units.

Results. A comparative characterization of heat recovery efficiency for the main types of heat exchange devices was performed. It has been established that using exhaust air as a stable energy source for heat pumps allows for high COP values even at low ambient temperatures. Critical parameters of temperature distribution on heat exchange surfaces have been determined, which helps minimize the risks of equipment icing and corrosion. It is proved that the integration of active heat recovery systems is a necessary condition for achieving Net Zero Energy Building (NZEB) performance.

Scientific novelty. The author substantiates the concept of a synergetic combination of passive recuperation methods with active heat pump technologies for the deep recovery of the thermal potential of ventilation emissions. The approach to assessing the energy potential of secondary resources in specific structures (underground and transport facilities) has been further developed, where the stability of the exhaust air temperature gradient allows for optimizing the operation of refrigeration cycles.

Practical significance. Practical recommendations for choosing heat recovery systems depending on the facility's purpose and flow tightness requirements have been formed. The results can be used by engineering specialists in designing energy-efficient climate control systems, as well as for modernizing existing ventilation networks to reduce operating costs and increase the energy efficiency class of buildings.

Key words: energy efficiency; ventilation emissions; heat recovery; heat pump; decarbonization; low-potential energy; energy potential.

Анотація. Мета. Дане дослідження спрямоване на проведення комплексного аналізу сучасних технологій утилізації теплового потенціалу вентиляційних викидів та оцінку їхньої ролі у забезпеченні нормативних вимог енергоефективності будівель. Основна увага приділяється визначенню найбільш ефективних конфігурацій систем рекуперації для різних типів об'єктів у контексті декарбонізації енергетичного сектору України.

Методика. У роботі застосовано методи системного аналізу діючої нормативно-правової бази (ДБН, Директиви ЄС) та порівняльний аналіз технічних характеристик сучасного вентиляційного обладнання. Використано термодинамічний підхід для оцінки ефективності передачі теплоти в роторних, пластинчастих рекуператорах та системах на базі теплових труб. Дослідження базується на моделюванні процесів низькопотенційної утилізації тепла з використанням теплонасосних циклів на базі компресорних установок.

Результати. Проведено порівняльну характеристику ефективності повернення теплоти для основних типів теплообмінних пристроїв. Встановлено, що використання витяжного повітря як стабільного джерела енергії для теплових насосів дозволяє досягти високих значень COP навіть при низьких температурах зовнішнього середовища. Визначено критичні параметри розподілу температур на поверхнях теплообміну, що дозволяє мінімізувати ризики обмерзання та корозії обладнання. Доведено, що інтеграція активних систем утилізації тепла є необхідною умовою для досягнення показників будівель із близьким до нульового споживанням енергії (NZEB).

Наукова новизна. Авторами обґрунтовано концепцію синергетичного поєднання пасивних методів рекуперації з активними теплонасосними технологіями для глибокої утилізації теплового потенціалу вентиляційних викидів. Удосконалено методичний підхід до оцінки енергетичного потенціалу вторинних ресурсів у специфічних спорудах (підземні та транспортні об'єкти), де стабільність температурного градієнта викидного повітря дозволяє оптимізувати роботу холодильних циклів.

Практична значимість. Сформовано практичні рекомендації щодо вибору систем утилізації тепла залежно від призначення об'єкта та вимог до герметичності потоків. Отримані результати можуть бути використані інженерно-технічними фахівцями при проектуванні енергоефективних систем кліматизації, а також для модернізації існуючих вентиляційних мереж з метою зниження експлуатаційних витрат та підвищення класу енергоефективності будівель.

Ключові слова: енергоефективність; вентиляційні викиди; рекуперація теплоти; тепловий насос; декарбонізація; низькопотенційна енергія; енергетичний потенціал.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Геополітичні, економічні, демографічні процеси в світі тісно пов'язані з доступом до енергоресурсів, використання яких призводить до змін клімату і глобального потепління. Маючи на меті сталий економічний розвиток, людство намагається знайти шляхи зниження залежності від невідновлювальних джерел енергії, декарбонізувати середовище (Паризька угода [1], Європейський зелений курс (European Green Deal) [2], [3]) і в перспективі досягти нульового споживання енергії. Для досягнення поставлених цілей створені та діють міжнародні агенства, асоціації та об'єднання, такі як: Міжнародне агентство з відновлюваної енергії (IRENA) [4], Мережа з розробки політики в галузі відновлюваної енергетики для XXI століття (REN21) [5], Всесвітня асоціація вітроенергетики (WWEA) [6], Міжнародне товариство сонячної енергії (ISES) [7], Міжнародне партнерство у сфері відновлюваної енергетики та підвищення енергоефективності (REEEP) [8] та інші.

За статистичними даними на 2023 рік, в ЄС домогосподарства та житловий сектор становили 26,2% кінцевого споживання енергії [9].

Ще більш актуальним питання економії енергоресурсів є для України, де військові дії призводять до пошкодження та знищення енергетичної інфраструктури: зниження залежності від енергоносіїв місцями переходить з площини розвитку в площину виживання населення. Багато зусиль в плані енергозбереження та енергодоступності направлені на впровадження положень сучасних ДБН, ДСТУ, оптимізацію технологічних процесів, інвестиції в технології зеленої енергетики, раціональне планування, децентралізацію тепло- та електрогенерації тощо.

Аналізуючи тематику наукових публікацій на прикладі ScienceDirect [10], можна відзначити зростаючу

актуальність та зацікавленість в дослідженнях, що пов'язані з утилізацією низькопотенційної теплоти вентиляційних викидів.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну увагу до законодавчих аспектів енергоефективності та загальних принципів термомодернізації будівель, комплексна оцінка взаємозалежного впливу кліматичних умов, рівня герметичності огорожувальних конструкцій та специфіки експлуатації різних типів рекупераційних систем (роторних, пластинчастих, фасадних) на фактичне зниження енергоспоживання в умовах України залишається недостатньо висвітленою проблемою. Розуміння складних процесів теплового обміну в теплообмінниках та їхнього впливу на мікроклімат приміщень є необхідним для переходу від формального виконання мінімальних вимог до створення будівель із нульовим рівнем викидів (ZEB). Це обумовило необхідність даного дослідження, спрямованого на визначення оптимальних технологічних рішень для вітчизняного житлового сектору. На основі аналізу літератури сформульовані ключові завдання дослідження:

1. Вивчити вплив кліматичних параметрів (тривалість опалювального періоду, температура зовнішнього повітря) на ефективність систем рекуперації тепла.

2. Оцінити технічні характеристики та обмеження сучасних технологій утилізації теплоти (роторні регенератори, фасадні системи, теплові насоси) щодо їхнього впливу на вологісний режим та енергобаланс будівлі.

3. Визначити потенціал економії первинної енергії при комплексному застосуванні енергоефективних заходів у системах вентиляції.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є комплексна оцінка впливу технологічних та експлуатаційних факторів на ефективність процесів утилізації низькопотенційної теплоти вентиляційних викидів та визначення оптимальних стратегій підвищення енергоефективності в Україні з урахуванням сучасних технологій рекуперації та регенерації тепла. Для досягнення поставленої мети сформульовано такі задачі:

1. Аналіз динаміки зміни теплового балансу будівлі при впровадженні енергозберігаючих заходів у систему вентиляції залежно від ступеня теплоізоляції та герметичності споруди.

2. Дослідження процесів повернення теплоти та вологи в приміщення.

3. Розробка рекомендацій щодо вибору типів вентиляційних установок (централізованих або децентралізованих) для різних кліматичних зон України з метою мінімізації термінів окупності та максимізації енергозбереження.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розглядаючи тепловий баланс будівлі як врівноваження між теплонадходженнями та тепловтратами, ефективність від впровадження енергозберігаючих заходів можемо виразити за допомогою коефіцієнтів m , n та z наступним співвідношенням:

$$\left(1 - \frac{z}{100}\right) Q_1^{\text{in}} + Q_2^{\text{in}} + Q_3^{\text{in}} = \left(1 - \frac{m}{100}\right) (Q_1^{\text{out}} + Q_2^{\text{out}}) + \left(1 - \frac{n}{100}\right) Q_3^{\text{out}}, \quad (1)$$

де Q_1^{in} , Q_2^{in} та Q_3^{in} – теплонадходження відповідно за рахунок опалення, інсоляції через світлопрозорі огороження та від внутрішніх джерел тепловиділення (метаболічна теплота, теплонадходження від електроприладів, освітлення тощо);

Q_1^{out} , Q_2^{out} та Q_3^{out} – тепловтрати відповідно за рахунок теплопровідності через зовнішнє огороження, підлогу та стелю, інфільтрації повітря через огороження та витрати на підігрів вентиляційного повітря;

m та n – коефіцієнти, що змінюються від 0% до 100% і характеризують собою ступінь впровадження енергоефективних заходів для зменшення відповідних тепловтрат через огороження та на вентиляцію;

z – коефіцієнт відображає відсоток зниження енерговитрат на опалення за рахунок впровадження відповідних енергоефективних заходів.

Додатковою характеристикою енергоефективності будівлі є температура теплового балансу. Вона визначається як температура зовнішнього повітря, за якої теплонадходження від внутрішніх джерел теплоти повністю компенсують тепловтрати, забезпечуючи підтримання заданої (розрахункової) внутрішньої температури повітря. Цю умову можна записати у вигляді рівняння теплового балансу:

$$Q_2^{\text{in}} + Q_3^{\text{in}} = Q_1^{\text{out}} + Q_2^{\text{out}} + Q_3^{\text{out}} \quad (2)$$

Також для оцінки енергоефективності будівлі та доцільності запровадження енергоефективних

заходів можемо скористатися поняттям коефіцієнту теплових надходжень як відношення внутрішніх теплонадходжень до загальних тепловитрат будівлі:

$$\psi = \frac{Q_2^{\text{in}} + Q_3^{\text{in}}}{Q_1^{\text{out}} + Q_2^{\text{out}} + Q_3^{\text{out}}} \quad (3)$$

За умови, коли розрахункова температура зовнішнього повітря дорівнює температурі теплового балансу, значення коефіцієнта теплових надходжень приймає максимальне значення $\psi = 1$ і це свідчить про економічну недоцільність впровадження будь-яких додаткових енергозберігаючих заходів для періоду опалення.

Аналізуючи формулу (1) можемо бачити, що при високих теплопровідних втратах будівлі впровадження енергоефективних технологій з підвищенням коефіцієнту n лише в систему вентиляції є економічно недоцільним. І навпаки, якщо досягається висока енергоефективність за рахунок теплоізоляції та герметизації будівлі, то впровадження заходів енергозбереження в систему вентиляції дозволяє додатково суттєво покращити показники енергоефективності.

Доцільність впровадження систем рекуперації в складі вентиляційних комплексів значною мірою залежить від кліматичних умов. Дослідження показують, що потенційна економія енергії в умовах суворого холодного клімату може бути у шість разів вищою, ніж у регіонах із м'якими зимами та коротким опалувальним періодом [11].

У районах із холодним кліматом підвищення ефективності рекуперації має істотний вплив на зниження загального енергоспоживання будівель, що підтверджується результатами, наведеними рис. 1.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Найбільш поширеною та ефективною енергозберігаючою технологією в системах вентиляції є рекуперація та регенерація. В основі найбільш поширених конструкцій вентиляційних пристроїв з регенерацією теплоти є роторні (обертові) теплообмінники та фасадні системи з реверсивним вентилятором. До рекуперативних систем належать поверхневі двопотокові трубчасті і пластинчасті теплообмінники, рекуператори з проміжним теплоносієм, теплові трубки та системи з тепловими насосами. Кожен тип пристроїв має свої переваги, недоліки та відповідне застосування.

Системи вентиляції використовуються у широкому спектрі будівель – від житлових і офісних до комерційних та громадських споруд (театрів, лікарень, басейнів тощо). Ефективність рекуперації теплоти в таких системах є орієнтовним показником і значною мірою залежить від конкретних умов експлуатації.

У загальному вигляді ефективність рекуперації (або коефіцієнт утилізації теплоти) визначається як відношення фактичного приросту температури припливного повітря до максимально можливого:

$$\eta = \frac{t_{mн} - t_{mв}}{t_{вн} - t_{mв}} \cdot 100\% \quad (4)$$

де $t_{mн}$ – температура зовнішнього припливного повітря на вході в рекуператор, °C;

$t_{mв}$ – температура припливного повітря на виході з рекуператора, °C;

$t_{вн}$ – температура витяжного (відпрацьованого) повітря на вході в рекуператор, °C.

Tomasz M. Mróz та Anna Dutka провели кілька тематичних досліджень [12], результати яких було проаналізовано за допомогою методу зваженої суми на основі комплексу критеріїв прийняття рішень. До складу цих критеріїв увійшли: ексергія рушійної сили, простий термін окупності, інвестиційні витрати, а також чотири моделі переваг. Ексерго-економічний аналіз показав, що роторний регенератор і протитечієний пластинчастий теплообмінник забезпечують найоптимальніше поєднання ефективності та капіталовкладень.

Ротаційні теплообмінники характеризуються відносно високими показниками ефективності, але через свої конструктивні особливості мають обмеження щодо використання. Нemoжливiсть забезпечити герметичність між каналами витяжного та поступаючого повітря призводять до повернення в будівлю частини вентиляційних викидів і при використанні роторного рекуператора в системі централізованої вентиляції може виникнути необхідність впровадження покращеної фільтрації та використання спеціальних матеріалів, які перешкоджатимуть розповсюдженню парів шкідливих речовин, неприємних запахів, вірусів та патогенних мікроорганізмів в разі їх локальної появи в одній з вентиляюємих частин будівлі. А це, в свою чергу, призводить до збільшення вартості та енергоспоживання установки.

Ще однією суттєвою особливістю роботи ротаційних рекуператорів у системах вентиляції є повернення частини вологи в приміщення. Kevin Michael Smith, Svend Svendsen провели дослідження впливу ротаційного рекуператора на вологісний режим у житловій будівлі та провели моделювання для типової квартири після ремонту у помірно вологому кліматі [13]. Дослідження показало, що роторний теплообмінник підходив лише для вентиляції окремих сухих приміщень, таких як вітальні та спальні, а використання його у поєднанні з кухнею та ванною кімнатою без впровадження додаткових заходів призведе до надмірної вологості у всій квартирі і до загрози появи цвілі.

Фасадні однопоточні регенератори з реверсивним вентилятором належать до децентралізованих систем вентиляції. Ці пристрої, подібно до роторних теплообмінників, також повертають частину вологи в приміщення під час опалювального періоду по причині циклічного руху теплого та холодного повітря вздовж одних і тих же поверхонь теплообміну. Ефективність рекуперації тепла в децентралізованих фасадних блоках залежить від часу циклу подачі/видалення [14]. Зі збільшенням кількості циклів теплова ефективність зростає і її максимальні значення досягаються за найкоротшої тривалості циклу (рис. 2).

K.Özdemir та E.Öğüt на основі створених ними математичних моделей теплообмінників на теплових трубках (THEX) та роторних колес (RHEX) з однаковим об'ємом і поперечним перерізом, що забезпечують однакові масові витрати, провели порівняльний аналіз ефективності процесів рекуперації теплоти між газовими середовищами за різних режимів роботи [15]. Поведінка математичних моделей в їхньому дослідженні порівнювалася з результатами експериментів

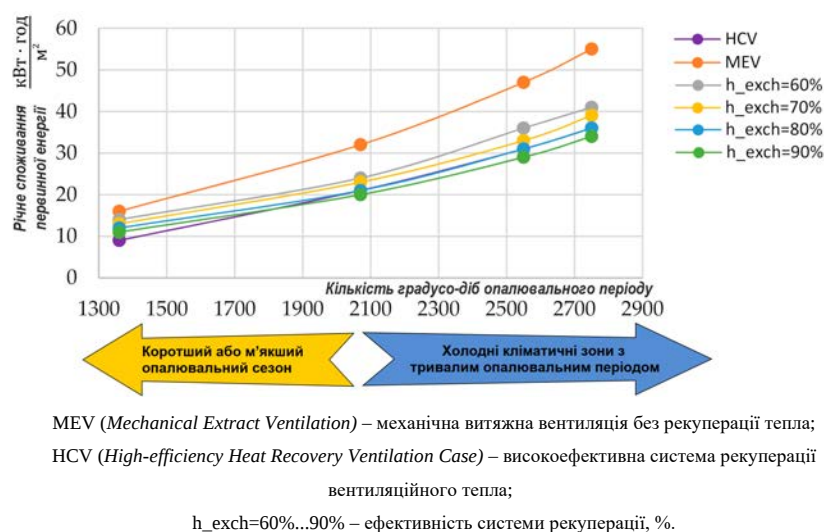
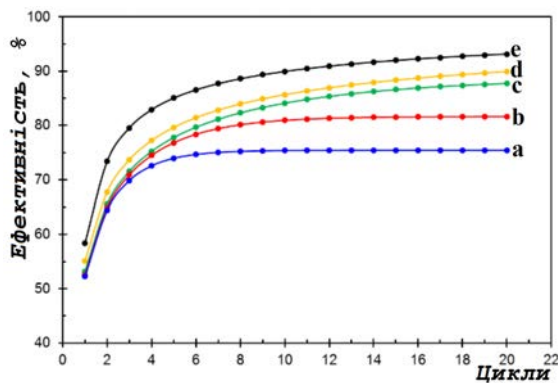


Рис. 1. Вплив ефективності рекуперації η (%) в системі вентиляції на річне споживання первинної енергії житловим будинком в залежності від кліматичних умов [11]

Q.Zhang та інших [16], при цьому похибки створених математичних моделей виявилися мінімальними. На рис. 3 – рис. 5 представлено порівняльні графіки цих досліджень при зміні температур та для 3-х швидкостей руху гарячого теплоносія $V_{hot.in}$ на вході в теплообмінник. Параметри холодного теплоносія на вході в теплообмінник у всіх режимах залишалися незмінними. Як видно з графіків, у всіх випадках за однакових швидкостей руху гарячого теплоносія теплообмінники на основі теплових трубок показали вищі значення коефіцієнта ефективності та значно нижчу необхідну потужність вентиляторів.



Графіки тривалості циклів: а – 90 сек; б – 75 сек; в – 50 сек; г – 20 сек; е – 5 сек.

Рис. 2. Графіки залежності ефективності роботи реверсивних вентиляційних установок від кількості циклів та їх тривалості [14]

Наведені дані вказують, що рекуператори на теплових трубках відзначаються високою ефективністю теплоутилізації у поєднанні з компактністю конструкції, що полегшує інтеграцію в вентиляційні установи різного призначення.

Інтеграція теплонасосних технологій у системи дозволяє додатково підвищити енергоефективність будівель і зменшити споживання первинної енергії.

Основним показником ефективності роботи теплового насосу є коефіцієнт перетворення енергії:

$$COP = \frac{Q}{P}, \quad (5)$$

де Q – кількість переданої споживачу теплової енергії;

P – витрати електроенергії на роботу теплового насосу.

На рис. 6 та рис. 7 для порівняння зображено відповідні ph -діаграми термодинамічних циклів роботи теплового насосу окремо та в поєднанні з системою відбору залишкової теплоти з вентиляційних викидів після рекуператора. Прийнято наступні умови: ККД роботи компресора $\eta_{comp} = 80\%$, температура у конденсаторі у двох варіантах незмінна $+30^\circ\text{C}$, температура зовнішнього повітря дорівнює -5°C , температура видаляемого повітря з рекуператора до впровадження теплового насосу $+5^\circ\text{C}$. Температурний напір повітря-випарник в двох випадках постійний і складає 5°C , прийнято мінімальні значення

перегріву парів холодоагенту перед компресором та їх переохолодження на виході з конденсатора. Тоді, у відповідності до позначень на рис. 6-7, тепловий потік в конденсаторі визначається перепадом ентальпій між точками 2 та 3, а питома робота компресора – перепадом ентальпій між точками 2 та 1. Так як витрати холодоносія в компресорі та у випарнику однакові, то, прийнявши відповідні позначення, можемо переписати формулу (6) для розглянутих варіантів роботи:

$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}, \quad (6)$$

де h_1, h_2, h_3 – значення ентальпії у відповідних точках 1, 2 та 3 на рис. 6-7.

Відповідно до прийнятих умов згідно виразу (6) робота теплового насоса без рекуперації (рис.6) має показник ефективності $COP_{min1} = 5,79$, а у випадку схеми з рекуперацією (рис.7) $COP_{min2} = 7,0$. Як видно з порівняння, тепловий насос дозволяє в повному об'ємі повернути в приміщення недоутилізовану у теплообміннику рекуператора теплоту, маючи при цьому незначний рівень електроспоживання.

Дослідження теплового потенціалу вентиляційних викидів підземних споруд метрополітенів

Авторами проведено дослідження з метою визначення енергетичного потенціалу та доцільності використання вентиляційних викидів з вентшахт підземних споруд метрополітену у м.Київ. В якості низькопотенційного джерела теплової енергії для роботи теплових насосів обрано вентиляційну шахту ст.м.«Політехнічний інститут». Тепловим споживачем для розрахунку розглянуто 6-типоверхову адміністративну будівлю поруч. Теплове споживання обраного об'єкта на опалення, ГВП та вентиляцію покривається за рахунок діючої електростанції тепловою потужністю 420 кВт. За проведеними розрахунками визначено, що теплота потреба для розрахункового періоду будівлі складає 406 кВт, а середнє значення за опалювальний сезон 197 кВт. Дослідження та розрахунки показали, що для зимового періоду верхня межа теоретичного теплового потенціалу вентиляційних викидів з вентшахти складає 570 кВт при максимальній температурі видаляемого повітря $+10^\circ\text{C}$ і зміщується в нижчу сторону до 255 кВт при мінімально-допустимій температурі видаляемого повітря $+5^\circ\text{C}$. При розрахунках приймалися гранично-допустимі норми температури, вологості та швидкостей руху повітря, які визначалися згідно ДБН В.2.3-7 «Споруди транспорту. Метрополітени», задавалися параметри номінального режиму роботи вентиляторів типу BOMD у вентшахті. За впровадження обраного теплотехнічного обладнання з теплової насосами типу BITZER GSU80421VL(Y) [17] дозволило б повністю покрити потреби в тепловій енергії розглянутої будівлі, забезпечивши впродовж опалювального сезону економію понад 50% електричної енергії у порівнянні з діючою електростанцією.

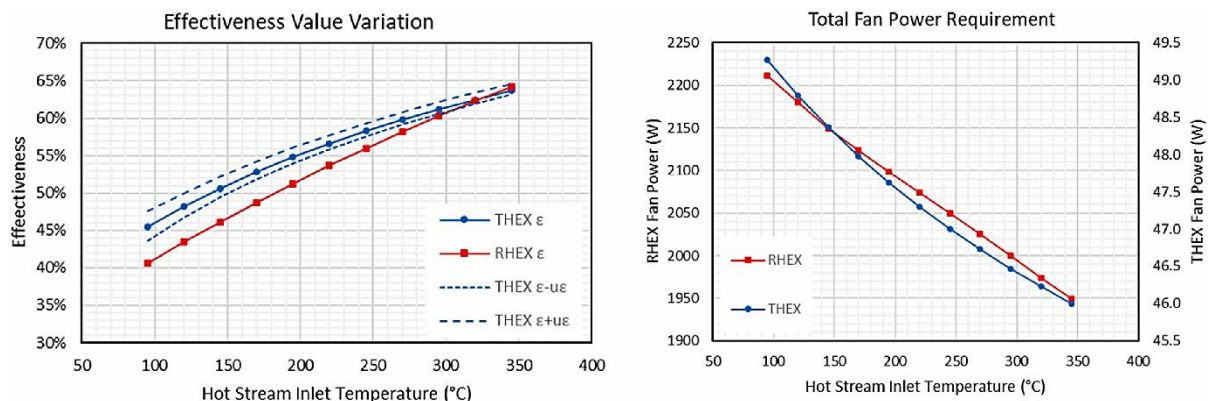


Рис. 3. Зміна ефективності (ліворуч) та загальної необхідної потужності вентиляторів (праворуч) при $V_{hot.in} = 2$ м/с.

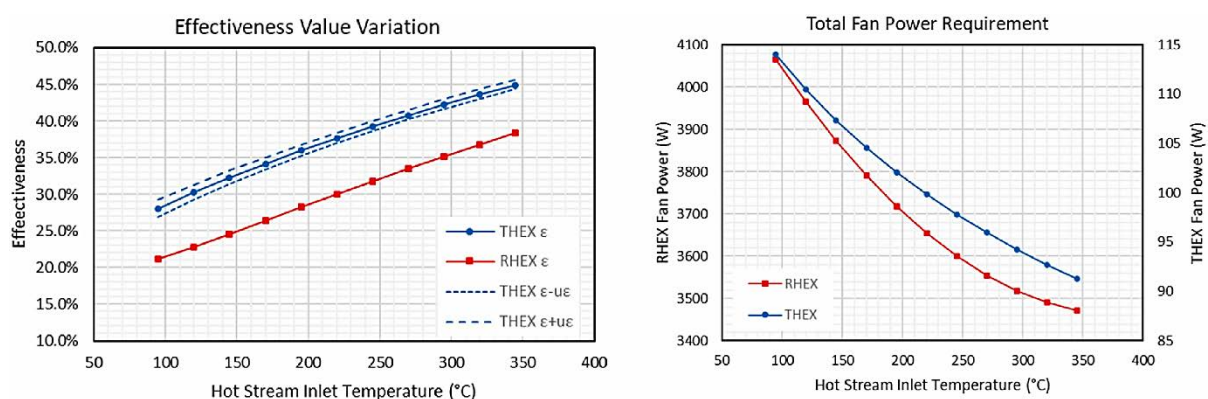


Рис. 4. Зміна ефективності (ліворуч) та загальної необхідної потужності вентиляторів (праворуч) при $V_{hot.in} = 4$ м/с.

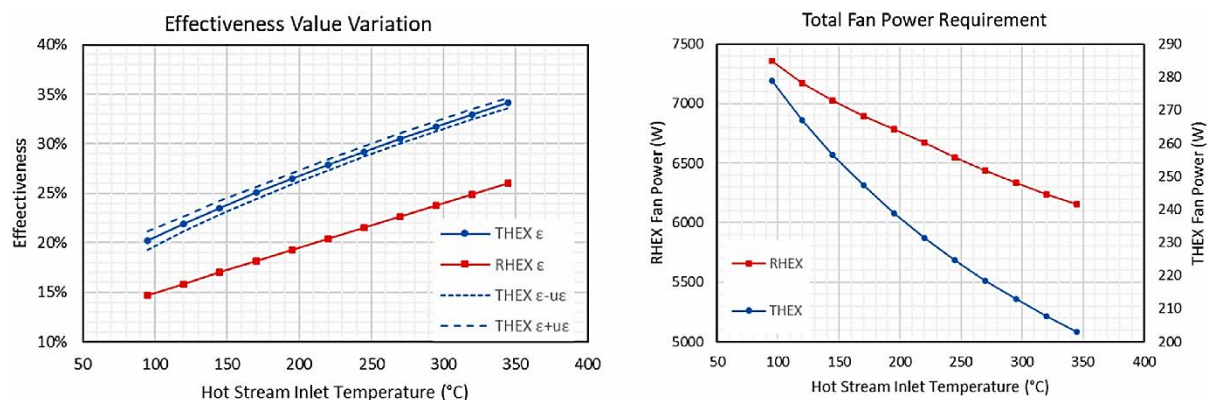


Рис. 5. Зміна ефективності (ліворуч) та загальної необхідної потужності вентиляторів (праворуч) при $V_{hot.in} = 6$ м/с.

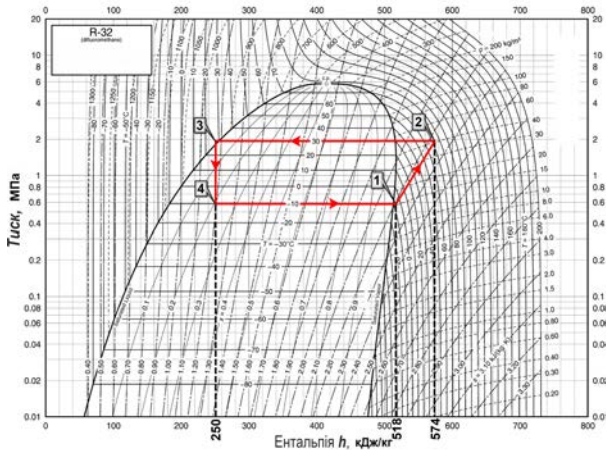


Рис. 6. p - h -діаграма R32. Термодинамічний цикл роботи теплового насоса без рекуператора

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз результатів дослідження підтверджує, що впровадження технологій утилізації тепла вентиляційних викидів є необхідним кроком для виконання сучасних нормативних вимог щодо енергоефективності будівель в Україні, зокрема ДБН В.2.5-67:2013. Отримані дані свідчать, що використання енергетичного потенціалу вентиляційних викидів дозволяє суттєво наблизитися до показників будівель із близьким до нульового споживанням енергії (NZEB), що відповідає вектору європейських директив.

Порівняння різних типів обладнання показує, що для об'єктів із великим об'ємом повітрообміну, таких як підземні споруди чи об'єкти підземної інфраструктури метрополітенів, використання стабільної температури витяжного повітря створює сприятливі умови для роботи теплонасосних систем. На відміну від традиційних повітряних теплових насосів, що залежать від коливань зовнішніх температур, утилізація тепла вентиляційних викидів забезпечує стабільно високий коефіцієнт перетворення енергії (COP) протягом усього опалювального періоду.

Гіпотеза щодо доцільності застосування комбінованих систем знаходить своє підтвердження при розгляді технічних рішень на базі сучасних компресорних установок. Обговорення характеристик таких систем вказує на можливість здійснення «глибокої» утилізації тепла, що значно підвищує загальний енергетичний ККД системи порівняно з використанням лише пасивних пластинчастих рекуператорів.

Встановлено, що перехід до комплексних технологій повернення теплоти дозволяє не лише знизити

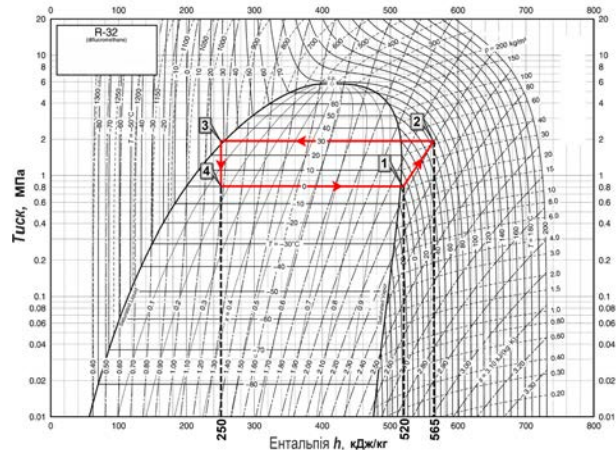


Рис. 7. p - h -діаграма R32. Термодинамічний цикл роботи теплового насоса з рекуператором

пряме споживання паливно-енергетичних ресурсів, а й оптимізувати встановлену потужність генеруючого обладнання систем опалення. Таким чином, результати обговорення доводять, що технологічна синергія рекуперації та теплонасосної утилізації є найбільш перспективним шляхом розвитку систем кліматизації в контексті декарбонізації та підвищення енергонезалежності.

ВИСНОВКИ

Відповідно до чинних норм [18], розрахунковий опалювальний період у містах України становить у середньому від 2500 до 4200 градусо-днів. Впровадження рекуперації та теплонасосних технологій в системи вентиляції може зменшити енергоспоживання будівлі більш ніж на 25%. Для досягнення високої ефективності перед впровадженням енергоефективних рішень необхідно попередньо ознайомитися з нормами законодавства, провести енергоаудит та техніко-економічні розрахунки, а також оцінити вплив на мікроклімат і комфорт.

Встановлення регенераторних систем у приміщеннях, де потрібно підтримувати низьку вологість або рекуператорів у нормально вологих зонах потребує додаткового обладнання для осушення чи зволоження відповідно. За низьких температур зовнішнього повітря енерговитрати на розморожування в регенераторах мінімальні або відсутні (на відміну від рекуператорів). Ротаційні теплообмінники можуть повернути неприємні запахи й шкідливі речовини до приміщення, що збільшує витрати на фільтрацію.

Велике значення має детальне планування та правильна послідовність впровадження

енергоефективних заходів. Наприклад, встановлення теплового насоса до утеплення будівлі без належного регулювання після глибокої термомодернізації може призвести до зміщення робочих точок компресорів і циркуляційних насосів, що знижує ККД системи. У будівлях, де тепловий насос забезпечує опалення та ГВП одночасно, така непослідовність може також призвести до зниження сезонного коефіцієнта ефективності (SCOP) та збільшення питомого електроспоживання.

Додатково, важливо враховувати кліматичні умови при виборі типу теплообмінника та оптимальних

параметрів його роботи. Ретельне проектування, включно з інтеграцією систем рекуперації та регенерації тепла, дозволяє досягти значної економії енергоресурсів і зменшення викидів CO₂, водночас забезпечуючи комфортний мікроклімат у приміщенні.

Висновки дослідження підтверджують, що комплексний підхід до впровадження енергоефективних заходів у системах теплозабезпечення дозволяє досягти максимального ефекту з економії енергії, підвищення ефективності обладнання та зниження витрат на експлуатацію будівлі, одночасно мінімізуючи негативний вплив на мікроклімат і комфорт.

REFERENCES

- [1] UNFCCC. (2015). The Paris Agreement. Retrieved from: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [2] European Commission. (2026). Questions and Answers: The European Green Deal. Retrieved from: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_24
- [3] Embassy of Ukraine to the EU. (2026). Climate. European Green Deal. Retrieved from: <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/posolstvo/galuzeve-spivrobotnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda>
- [4] IRENA. (2026). International Renewable Energy Agency. Retrieved from: <https://www.irena.org/>
- [5] REN21. (2026). Renewables Now. Retrieved from: <https://www.ren21.net/>
- [6] WWEA. (2026). World Wind Energy Association. Retrieved from: <https://www.wwindea.org/>
- [7] ISES. (2026). International Solar Energy Society. Retrieved from: <https://www.ises.org/>
- [8] REEEP. (2026). Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership. Retrieved from: <https://reeep.org/>
- [9] Eurostat. (2026). Energy consumption in households. Retrieved from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households
- [10] ScienceDirect. (2026). Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/>
- [11] El Fouih, Y., Stabat, P., Rivière, P., Hoang, P., & Archambault, V. (2012). Adequacy of air-to-air heat recovery ventilation system applied in low energy buildings. *Energy and Buildings*, 54, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.008>
- [12] Mróz, T. M., & Dutka, A. (2015). Exergy-economic evaluation of heat recovery device in mechanical ventilation system. *Energy and Buildings*, 86, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.026>
- [13] Smith, K. M., & Svendsen, S. (2016). The effect of a rotary heat exchanger in room-based ventilation on indoor humidity in existing apartments in temperate climates. *Energy and Buildings*, 116, 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.025>
- [14] Genc, A. M., Karadeniz, Z. H., Ekren, O., & Toksoy, M. (2019). A Novel Spherical Packed Bed Application on Decentralized Heat Recovery Ventilation Units. *E3S Web of Conferences*, 111, 01012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911101012>
- [15] Özdemir, K., & Ögüt, E. (2026). A comparative analysis of heat pipe and rotary regenerative heat exchangers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 72, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106274>
- [16] Zhang, Q., Sun, F., & Chen, C. (2019). Research on the three-dimensional wall temperature distribution and low-temperature corrosion of quad-sectional air preheater in larger power plant boilers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 739–747. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.006>
- [17] Bitzer. (2026). Compressors ORBIT 1 Series. Retrieved from: <https://www.bitzer.de/gb/en/air-conditioning-and-process-cooling/air-conditioning/standard/cooling-capacity-0-50kw/compressors/orbit-1-series/>
- [18] DSTU-N B V.1.1-27:2010. (2011). Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiynykh vplyviv, vid pozhezh. Budivelnna klimatolohiia [Protection against dangerous geological processes, harmful operational effects, from fire. Construction climatology]. Kyiv, Ukraine: Minrehionbud Ukrainy.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] UNFCCC. (2015). The Paris Agreement. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [2] European Commission. (2026). Questions and Answers: The European Green Deal. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_24
- [3] Посольство України при ЄС. (2026). Клімат. Європейська зелена угода. URL: <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/posolstvo/galuzeve-spivrobotnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda>
- [4] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2026). URL: <https://www.irena.org/>
- [5] REN21. (2026). Renewables Now. URL: <https://www.ren21.net/>
- [6] World Wind Energy Association (WWEA). (2026). URL: <https://www.wwindea.org/>
- [7] International Solar Energy Society (ISES). (2026). URL: <https://www.ises.org/>

- [8] Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership (REEEP). (2026). URL: <https://reep.org/>
- [9] Eurostat. (2026). Energy consumption in households. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households
- [10] ScienceDirect. (2026). URL: <https://www.sciencedirect.com/>
- [11] El Fouih Y., Stabat P., Rivière P., Hoang P., Archambault V. (2012). Adequacy of air-to-air heat recovery ventilation system applied in low energy buildings. *Energy and Buildings*, 54, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.008>
- [12] Mróz T.M., Dutka A. (2015). Exergy-economic evaluation of heat recovery device in mechanical ventilation system. *Energy and Buildings*, 86, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.026>
- [13] Smith K.M., Svendsen S. (2016). The effect of a rotary heat exchanger in room-based ventilation on indoor humidity in existing apartments in temperate climates. *Energy and Buildings*, 116, 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.025>
- [14] Genc A.M., Karadeniz Z.H., Ekren O., Toksoy M. (2019). A Novel Spherical Packed Bed Application on Decentralized Heat Recovery Ventilation Units. *E3S Web of Conferences*, 111, 01012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911101012>
- [15] Özdemir K., Ögüt E. (2026). A comparative analysis of heat pipe and rotary regenerative heat exchangers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 72, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106274>
- [16] Zhang Q., Sun F., Chen C. (2019). Research on the three-dimensional wall temperature distribution and low-temperature corrosion of quad-sectional air preheater in larger power plant boilers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 739–747. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.006>
- [17] Bitzer. (2026). Compressors ORBIT 1 Series. URL: <https://www.bitzer.de/gb/en/air-conditioning-and-process-cooling/air-conditioning/standard/cooling-capacity-0-50kw/compressors/orbit-1-series/>
- [18] ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. (2011). Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Київ: Мінрегіонбуд України.

© Баранюк О. В., Тихонюк С. Л.

Дата першого надходження статті до видання: 12.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)